Operational Transconductance Amplifiers

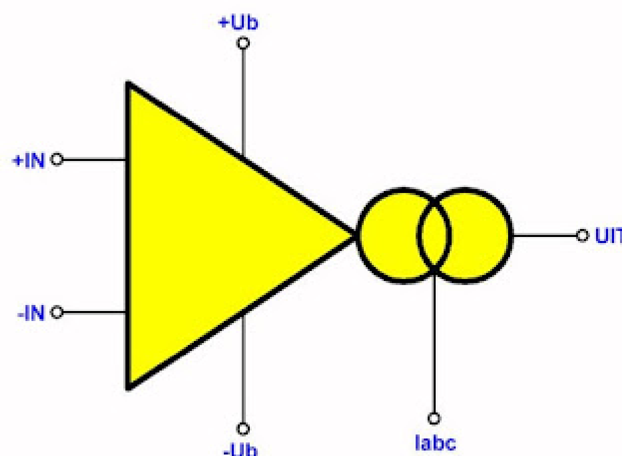
Een Operational Transconductance Amplifier (OTA) is een speciale op-amp met een stroombron in de uitgang. Deze eigenschap maakt een OTA uitermate geschikt voor allerlei analoge toepassingen, zoals spanningsgestuurde versterkers, idem filters en zelfs gyratoren.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 20-06-2019

Kennismaking met de OTA

Een rijke historie
In de gloriedagen van de analoge techniek waren OTA's zeer gewilde componenten die veel toepassingen vonden in analoge versterkerschakelingen. Bekende IC-fabrikanten zoals RCA, Harris, NatSemi en Intersil brachten diverse schakelingen op de markt die beroemd werden en ingezet werden als basis van spanningsgestuurde versterkers, idem filters en zelfs gyratoren. Helaas zijn de meeste van deze schakelingen verdwenen. Gelukkig is de bekendste OTA ooit gefabriceerd, de CA3080 of LM3080, nog steeds goed leverbaar via de meeste onderdelenleveranciers. Bovendien is er van dit IC een kloon op de markt verschenen, de NTE996, die u via de bekende kanalen op internet kunt bestellen.
Het is dus zeker de moeite waard deze oude analoge schakeling weer eens onder de aandacht te brengen.

De OTA, Operational Transconductance Amplifier
De OTA, de '*Operational Transconductance Amplifier*', behoort tot de familie der operationele versterkers. In grote lijnen heeft een OTA dezelfde eigenschappen als een gewone op-amp. Twee ingangen, één uitgang, twee voedingsaansluitingen en een symbool dat in grote lijnen op dat van een gewone op-amp lijkt. Dat symbool is getekend in de onderstaande figuur.



Het symbool van een OTA. (© 2019 Jos Verstraten)

Stroombron
Het voornaamste schakeltechnische verschil tussen een gewone operationele versterker en een OTA is een stroombron, die in serie staat tussen de uitgang van de operationele versterker en de uitgang van de schakeling. Deze stroombron heeft een stuuringang I_{abc},

hetgeen er op wijst dat deze stroombron programmeerbaar is. De OTA levert dus een stroom aan de belasting, dit in tegenstelling tot een operationele versterker die een uitgangsspanning aflevert. En net zoals een operationele versterker zowel positieve als negatieve uitgangsspanningen kan leveren, kan een OTA positieve en negatieve stromen leveren.

Source en sink
Als de OTA een positieve stroom levert, zal de stroom vanuit de uitgang van de 0TA naar de belasting vloeien. Men spreekt in dit geval van een *'current source'*, een stroombron. Als de OTA een negatieve stroom levert, dan zal de uitgang van de schakeling stroom vragen van de belasting. Men spreekt in dit geval van een *'current sink'*, letterlijk vertaald een stroom gootsteen.

De grootte van de uitgangsstroom
De grootte van de uitgangsstroom hangt van een aantal factoren af.

- **Het spanningsverschil tussen beide ingangen**
  Hoe groter dit spanningsverschil, hoe groter de stroom die de OTA levert of opneemt. De richting van de stroom wordt bepaald door de polariteit van de ingangsspanningen. Is de spanning op de niet-inverterende ingang groter dan de spanning op de inverterende ingang, dan zal de OTA een stroom aan de belasting leveren. In het omgekeerde geval zal de schakeling een stroom van de belasting opnemen.
- **De 'Amplifier Bias Control'-stroom**
  De uitgangsstroom wordt ook bepaald door de grootte van de I_{abc}, de *'Amplifier Bias Control'*-stroom. Dat is logisch, want deze stuuringang werkt rechtstreeks in op de stroombron in de uitgangskring van de schakeling.
- **Een constante factor**
  De uitgangsstroom wordt ook nog bepaald door een constante factor X, die bij vele OTA's (maar niet bij alle) gelijk is aan 19,2.

Het verband tussen deze drie factoren kan als volgt in formulevorm worden voorgesteld:
$I_{uit} = X \bullet I_{abc} \bullet \Delta U_{in}$

De transconductantie
De *'transconductantie'* van een OTA is een belangrijke eigenschap van de schakeling. Deze grootheid, die wordt voorgesteld door g_m, is gelijk aan het product van de reeds genoemde constante factor X en de I_{abc}. In formulevorm:
$g_m = X \bullet I_{abc}$
De transconductantie noemt men in het Nederlands de *'geleidingsoverdracht'* of 'steilheid' van de schakeling. Deze factor wordt uitgedrukt in Mho (de omgekeerde Ω, dus 1/Ω of Ω^{-1}) of in Siemens, S.
De uitgangsstroom kan ook voorgesteld worden door de uitdrukking:
$I_{uit} = g_m \bullet \Delta U_{in}$
Uit de formule voor g_m mag u overigens niet afleiden dat het verband tussen g_m en I_{uit} over een onbeperkt bereik lineair is. Een belangrijke eigenschap van iedere OTA is het aantal decaden in g_m-variatie, waarbinnen dit lineaire bereik geldig is. Voor een populaire OTA als de CA3080 geldt dit lineaire bereik over drie decaden.

De uitgangsimpedantie
Een ander belangrijk verschil tussen een OTA en een gewone operationele versterker is de uitgangsimpedantie. Bij een gewone op-amp streeft men er naar de uitgangsimpedantie zo laag mogelijk te maken. Een OTA is echter een stroombron en een stroombron heeft per definitie een zeer hoge inwendige weerstand. De uitgangsimpedantie van een OTA is bovendien niet constant, maar afhankelijk van de uitgangsstroom die geleverd wordt.
Bij de reeds genoemde CA3080 wordt het verband tussen g_m en I_{abc} gegeven door de factor 19,2. Een stuurstroom van 10 µA heeft dus een g_m van 192 µS tot gevolg. Bij deze transconductantie zal de uitgangsimpedantie van de schakeling gelijk zijn aan niet minder dan 700 MΩ! Bij een stuurstroom van 1 mA wordt de waarde van g_m gelijk aan 19,2 mS en daalt de uitgangsimpedantie van de OTA tot 7 MΩ.

Een gevoelige uitgang
Uit deze eigenschap kunt u afleiden dat u zeer voorzichtig moet omgaan met de uitgang van een OTA. De zeer hoge impedantie op dat punt kan in de praktijk tot grote problemen leiden. Zo zal het duidelijk zijn dat de uitgang van een OTA zeer gevoelig is voor het oppikken van stoorsignalen zoals brom. In de meeste gevallen moet u dan ook de uitgang van de OTA zo dicht mogelijk bij de uitgangspen afsluiten met een bufferversterker, die de uitgangsimpedantie van de schakeling reduceert of de uitgangsstroom omzet in een uitgangsspanning.

Samenvatting
Aan de hand van de bespreking van de eigenschappen van een OTA kunt u de werking van de schakeling als volgt samenvatten: *een OTA is een schakeling die een stroom levert aan de belasting, waarbij de waarde van deze stroom afhankelijk is van het spanningsverschil tussen beide ingangen en van de grootte van een stuurstroom* I_{abc}.

Spanningen op de ingangen
Een derde verschil tussen een gewone operationele versterker en een OTA is het gedrag van de ingangen. Bij een gewone op-amp hebben de ingangen een zo hoog mogelijke impedantie en kunt u bij sommige toepassingen spanningsverschillen van volts tussen de ingangen zetten. Een OTA heeft echter tamelijk laagohmige ingangen en bovendien mag u niet meer dan 20 mV spanningsverschil tussen de twee ingangen aanbrengen. Dat betekent dat u in de meeste gevallen moet werken met zeer laagohmige spanningsdelers aan de ingangen, die de te verwerken spanningen eerst tot het mV-bereik terug brengen.

Ingangsimpedantie
Een tweede belangrijke eigenschap van de ingangen van OTA's is dat de ingangsimpedantie in grote mate afhankelijk is van de waarde van de stuurstroom I_{abc}. Voor een CA3080 varieert de ingangsimpedantie bijvoorbeeld tussen 10 MΩ en 10 kΩ voor een I_{abc} tussen 100 nA en 1 mA.

Toepassingen van OTA's
Bij een eerste kennismaking lijken OTA's helemaal niet zo'n interessante onderdelen. Wat hebt u immers aan schakelingen die nauwelijks aangestuurd kunnen worden en die bovendien een zeer hoge uitgangsimpedantie hebben? Voor een heleboel toepassingen hebt u inderdaad niets aan een OTA. Maar er zijn net zoveel toepassingen waarvoor die bijzondere eigenschappen zeer waardevol zijn. Sterker nog, dat zijn toepassingen die zonder gebruik te maken van een OTA maar heel moeilijk te realiseren zijn.
Een paar voorbeelden waar OTA's op hun plaats zijn:

- Spanningsgestuurde versterkers.
- Spanningsgestuurde filters.
- Spanningsgestuurde oscillatoren.
- Analoge vermenigvuldigers.
- Driehoek naar sinus omzetters.
- Sample and hold schakelingen.
- Amplitude-modulatoren.

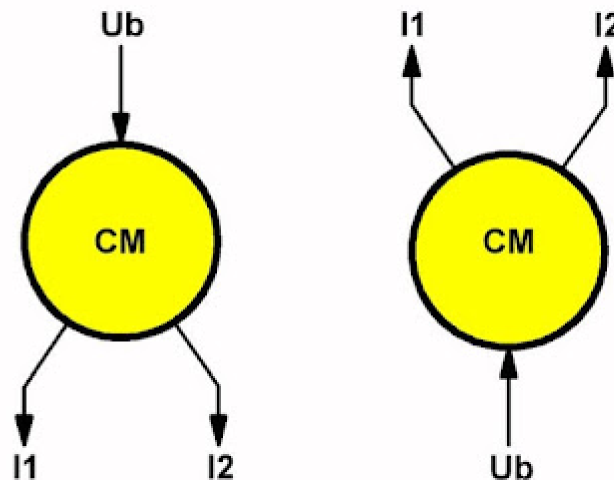
Interessante analoge basisschakelingen, waar u als hobbyist heel wat uren mee kunt experimenteren.

De interne schakeling van een OTA

Inleiding
Voor het in de praktijk kunnen werken met een OTA hebt u inzicht nodig in de werking van de schakeling. In dit hoofdstuk zullen wij daarom vrij diepgaand ingaan op de manier waarop men OTA's ontwerpt. Een van de basisschakelingen die gebruikt worden is een

'stroomspiegel'. Vandaar wordt deze theoretische bespreking dan ook begonnen met het verklaren van dit begrip.

De stroomspiegel
Een stroomspiegel, in het Engels *'current mirror'* genoemd, is een schakeling die een bepaalde extern vastgestelde stroom I_1 op de ingang aangeboden krijgt en op de uitgang een even grote tweede stroom I_2 opwekt. Deze tweede stroom staat echter helemaal los van de eerste stroom en kan naar een willekeurig punt van een schakeling gevoerd worden, zonder dat de ingangsstroom daardoor beïnvloed wordt. U kunt een stroomspiegel dus een stroomtrafo noemen met een een-op-een verhouding tussen primaire en secundaire kant. Het symbool van een stroomspiegel is voorgesteld in de onderstaande figuur. Uit het feit dat er twee symbolen bestaan kunt u afleiden dat er stroomspiegels bestaan die stromen sourcen en stroomspiegels bestaan die stromen sinken. Wél geldt steeds dat de in- en de uitgangsstromen in dezelfde richting vloeien: dus van de stroomspiegel naar de buitenwereld of van de buitenwereld naar de stroomspiegel.



Het symbool van een stroomspiegel. (© 2019 Jos Verstraten)

Basisschakeling van een stroomspiegel
De basisschakeling van een stroomspiegel is getekend in de onderstaande figuur. De drie transistoren worden verondersteld volledig identieke eigenschappen te hebben, hetgeen met de moderne integratietechnieken niet zo'n groot praktisch probleem is.
De werking van de schakeling berust op het feit dat er een bepaald verband bestaat tussen de basis/emitter-spanning van een transistor en de collectorstroom. Dat verband is exponentieel en kan als volgt in formulevorm uitgedrukt worden:
$I_c = cte \bullet e^{[U_{be} \bullet U_t]}$
In deze formule is:
- I_c de collectorstroom van de transistor.
- cte een constante afhankelijk van de eigenschappen van de transistor.
- U_{be} de basis/emitter-spanning;
- U_t een spanning die bepaald wordt door de temperatuur.
- Het getal e wordt ook de constante van Neper (Napier) genoemd.

Als twee transistoren uit hetzelfde materiaal gemaakt zijn en op dezelfde temperatuur staan, dan zijn de factoren cte en Ut identiek.
U kunt dus besluiten dat als u aan identieke transistoren gelijke U_{be}-spanningen aanlegt er gelijke collectorstromen zullen vloeien.



De basisschakeling van een stroomspiegel. (© 2019 Jos Verstraten)

Berekeningen
Aan de hand van deze wetenschap kunt u met wat eenvoudige formules aantonen dat de stromen I_1 en I_2 identiek zijn. In het schema hebben de transistoren T1 en T2 identieke basis/emitter-spanningen. U kunt dus aannemen dat de twee collectorstromen even groot zijn:

$I_{c1} = I_{c2}$

Vervolgens kunt u in het schema een aantal stroomvergelijkingen opstellen aan de hand van de Wet van Kirchoff. Deze wet zegt dat de som van de stromen die naar één punt vloeien gelijk is aan de som van de stromen die uit dat punt wegvloeien.
Dus:

$I_{c1} = I_1 - I_{b3}$

$I_{c2} = I_{c3} + I_{b3} - I_{b1} - I_{b2}$

Omdat:

$I_{c1} = I_{c2}$

kunt u deze formules vereenvoudigen tot:

$I_1 - I_{b3} = I_2 + I_{b3} - I_{b1} - I_{b2}$

Vanwege de identieke eigenschappen van alle drie de transistoren kunt u de basisstromen aan elkaar gelijk stellen:

$I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = I_b$

De formule kan dan nog meer vereenvoudigd worden tot:

$I_1 - I_b = I_2 + I_b - I_b - I_b$

of:

$I_1 - I_b = I_2 - I_b$

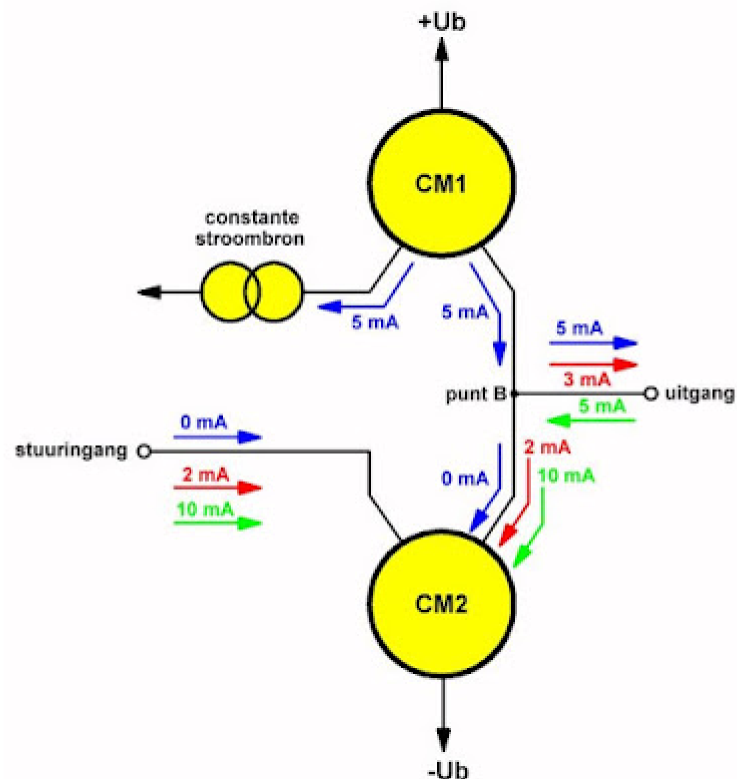
of:

$I_1 = I_2$

Waarmee wordt bewezen wordt dat de basisschakeling van een OTA, de stroomspiegel, voldoet aan de gestelde eigenschap van stroomtransformatie met een verhouding van 1 op 1.

Twee gecombineerde stroomspiegels
In de onderstaande figuur zijn twee stroomspiegels in serie geschakeld. De bovenste CM1 is een stroom-source, de onderste CM2 is een stroom-sink. U kunt nu gemakkelijk aantonen dat het met deze schakeling mogelijk is een stuurstroom die in één richting vloeit om te zetten in een uitgangsstroom die in twee richtingen kan vloeien.

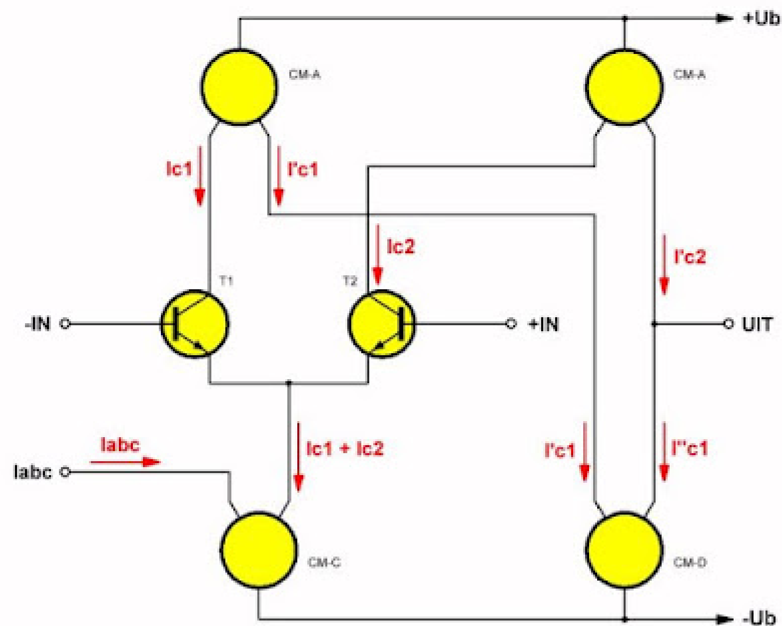
Dat komt al aardig in de buurt van de voornaamste eigenschap van een OTA!



Twee stroomspiegels vormen de basis van het interne schema van een OTA.
(© 2019 Jos Verstraten)

De ingang van CM1 is aangesloten op een constante stroombron die een stroom van 5 mA trekt. De onderste stroomspiegel wordt gestuurd door een externe stroom, die kan variëren tussen 0 mA en 10 mA. Als deze stuurstroom 0 mA bedraagt, dan trekt de onderste stroomspiegel geen stroom. De 5 mA uitgangsstroom van de bovenste spiegel kan dan alleen afvloeien naar de uitgang (blauwe pijltjes). Als de stuurstroom wordt ingesteld op 2 mA trekt CM2 ook een stroom van 2 mA in de uitgang. De stroom van de bovenste spiegel splitst zich dan in twee delen. Van de 5 mA vloeit 2 mA af naar de onderste stroomspiegel en 3 mA via de uitgang naar de belasting (rode pijltjes).
Stelt u de stuurstroom in op 10 mA, dan zal de onderste stroomspiegel 10 mA uit de buitenwereld trekken. Van deze 10 mA wordt 5 mA geleverd door de bovenste stroomspiegel. De ontbrekende 5 mA moet geleverd worden door de op de schakeling aangesloten belasting (groene pijltjes).
Als u dus de stuurstroom langzaam varieert van 0 mA naar 10 mA, dan zal de uitgang van de schakeling eerst een stroom van 5 mA leveren. Naarmate de stuurstroom stijgt zal de uitgangsstroom afnemen. Als de stuurstroom gelijk is aan 5 mA is de uitgang volledig stroomloos. Nadien gaat de uitgang geen stroom meer leveren, maar stroom opeisen van de belasting. In het uiterste geval (stuurstroom 10 mA) trekt de uitgang 5 mA vanuit de belasting.

Het basisschema van een OTA
In de onderstaande figuur is het basisschema van een OTA getekend. De twee ingangen -IN en +IN gaan, net zoals bij een gewone operationele versterker, naar de twee basissen van een verschilversterker. Transistor T1 stuurt de ingang van de stroomspiegel CM-A, transistor T2 stuurt de ingang van CM-B. CM-A levert op zijn beurt de ingangsstroom voor de stroomspiegel CM-D. Deze vormt, samen met CM-B, het reeds beschreven systeem dat zowel positieve als negatieve uitgangsstromen kan leveren. De stuuringang I_{abc} van de OTA levert de ingangsstroom voor de vierde stroomspiegel CM-C.



Het basisschema van een OTA. (© 2019 Jos Verstraten)

Werking van de schakeling
De werking van de schakeling kan als volgt worden samengevat. De stuurstroom I_{abc} legt de grootte van de somstroom van de beide ingangstransistoren vast. Deze somstroom verdeelt zich tussen de twee ingangstransistoren. De verdeling is afhankelijk van de spanningsverhouding tussen beide ingangen. Staan beide ingangen op dezelfde spanning, dan zal de stroom zich keurig in twee even grote delen splitsen. De collectorstromen zijn dan aan elkaar gelijk.
Het is gemakkelijk in te zien dat in dit specifieke geval de volgende stroomgelijkheden in de schakeling gelden:
$I_{c1} = I'_{c1} = I''_{c1}$
en:
$I_{c1} = I_{c2} = I'_{c2}$
Uit deze beide vergelijkingen kunt u afleiden dat:
$I''_{c1} = I'_{c2}$

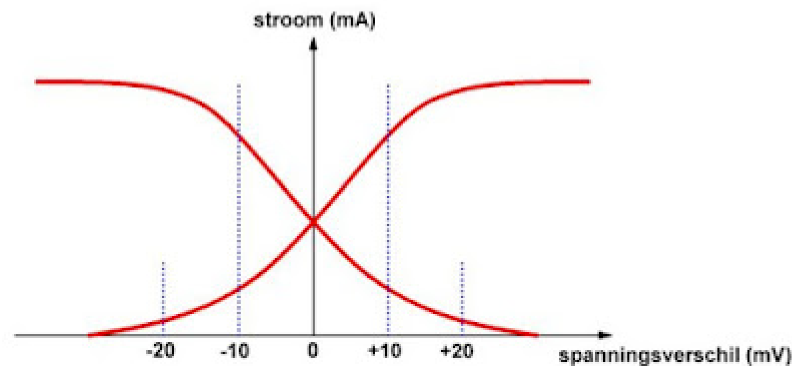
Besluit
Als beide ingangsspanningen even groot zijn, dan wordt de door stroomspiegel CM-B geleverde stroom volledig opgenomen door stroomspiegel CM-D.

Spanningsverschil tussen de ingangen
Deze situatie verandert als er een spanningsverschil ontstaat tussen beide ingangen. Stel dat de niet-inverterende ingang positiever wordt dan de inverterende ingang. De collectorstroom van T2 wordt dan groter dan deze van T1. Het gevolg is dat I'_{c2} groter wordt dan I''_{c1}. De stroomspiegel CM-B levert meer stroom dan de stroomspiegel CM-D kan opnemen en het restant van de stroom vloeit al naar de belasting van de OTA.
Op dezelfde manier kunt u aantonen dat in het omgekeerde geval (spanning op niet-inverterende ingang kleiner dan spanning op inverterende ingang) de stroomspiegel CM-D meer stroom vraagt dan stroomspiegel CM-B kan leveren. De schakeling vraagt dan een stroom van de belasting.

Algemeen besluit
De conclusie van deze werkingsbespreking is dat de gestelde formule, die het verband geeft tussen de uitgangsstroom, het spanningsverschil tussen de ingangen en de stroom I_{abc} klopt.

De ingangstrap
Zoals uit het voorgaande volgt berust de werking van de schakeling op de verdeling van de stroom, die door CM-C wordt geleverd, tussen T1 en T2. In de grafiek van de onderstaande

figuur is deze stroomverdeling grafisch weergegeven in functie van het spanningsverschil tussen beide ingangen. Als het spanningsverschil 0 V is, zal de stroom zich keurig in twee even grote delen verdelen. Naarmate het spanningsverschil tussen beide ingangen stijgt, zal een van de collectorstromen steeds dichter bij nul komen en de tweede uiteraard steeds dichter bij de maximale waarde I_{abc}. Deze grenswaarden worden reeds bij een spanningsverschil van ongeveer 20 mV bereikt! Uit de grafiek kunt u verder afleiden dat er maar een klein gebied rond de nul bestaat, waar het verband tussen het spanningsverschil en de stroomverdeling lineair is. Dit gebied is niet groter dan ongeveer ±10 mV. Vandaar dat reeds eerder in dit verhaal werd opgemerkt dat u het spanningsverschil tussen beide ingangen tot maximaal 20 mV moet beperken.

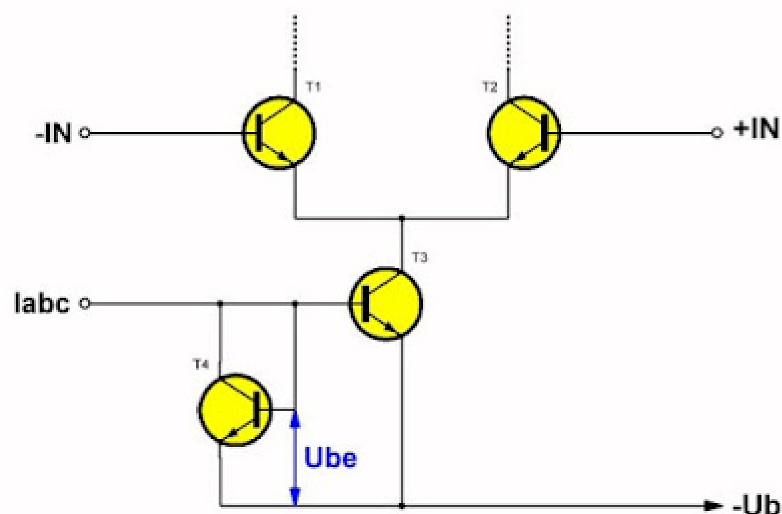


De stroomverdeling tussen beide ingangstransistoren in functie van het spanningsverschil. (© 2019 Jos Verstraten)

De stroomspiegel CM-C

De stroomspiegel CM-C vormt de basis van het schema van een OTA. Deze stroomspiegel bepaalt immers hoe de stuurstroom I_{abc} in het IC wordt verwerkt. Om in de praktijk met een OTA te kunnen werken is het noodzakelijk enig inzicht te hebben in de manier waarop deze stroomspiegel is samengesteld. Het praktische schema is getekend in de onderstaande figuur.

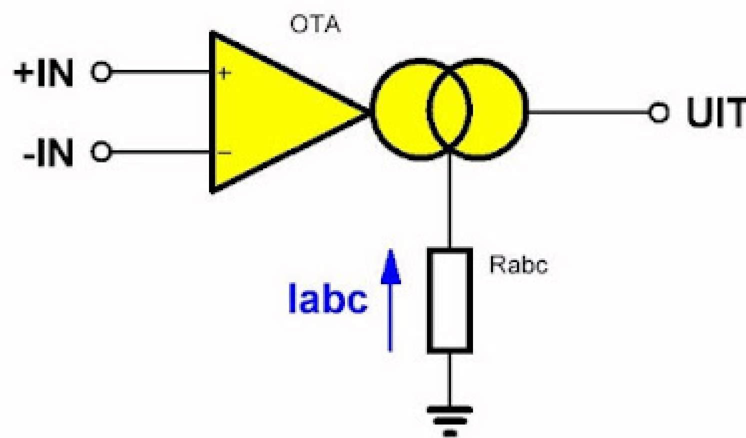
Tussen de negatieve voedingsaansluiting van het IC en de I_{abc}-ingang staat de als diode geschakelde transistor T4. Over een geleidende diode valt een spanning van ongeveer 0,65 V. ***De spanning op de stuuringang van de OTA staat dus steeds op een spanning die slechts 0,65 V positiever is dan de negatieve voedingsspanning!*** Als de OTA gevoed wordt uit een symmetrische voeding van ±12 V, zal de I_{abc}-ingang op een spanning staan van ongeveer -11,35 V. Het zal duidelijk zijn dat dit een zeer belangrijk gegeven is, waar u bij het ontwerpen van OTA-schakelingen terdege rekening mee moet houden. Ook zal het duidelijk zijn dat u het IC heel snel kunt beschadigen door een te grote stroom in de I_{abc}-ingang te sturen. De als diode geschakelde transistor gaat dan stuk. U mag ook nooit rechtstreeks een spanning op deze ingang zetten! De lage impedantie van de geleidende diode trekt dan een zeer grote stroom en de chip van de OTA smelt.



Genereren van de I_{abc}

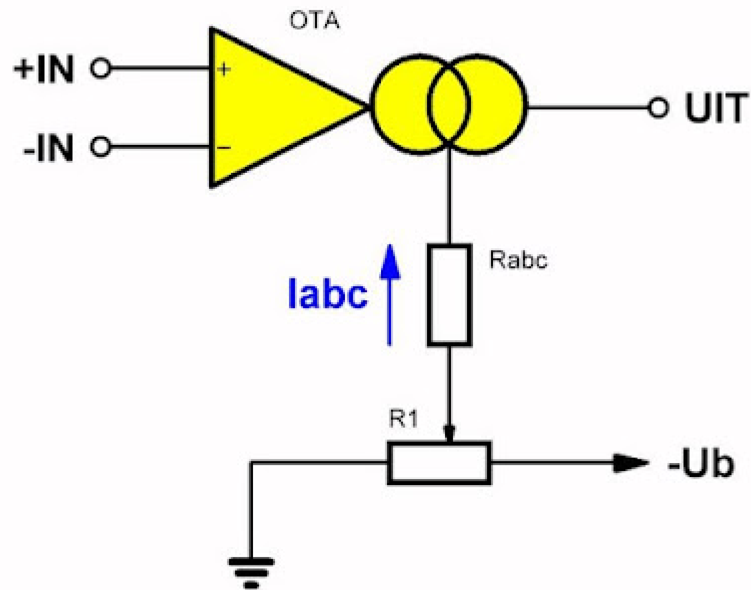
Inleiding
De grootte van de stuurstroom I_{abc} bepaalt de werking van een OTA in belangrijke mate. Aan het opwekken van deze stroom moet u dan ook de nodige aandacht besteden. Er bestaan verschillende systemen voor, van eenvoudig tot ingewikkeld. In de volgende paragrafen zullen deze systemen een na een in het kort worden besproken.

Instellen op een vaste waarde
Het meest eenvoudige systeem voor het instellen van de stuurstroom is een weerstand aan te brengen tussen de massa en de I_{abc}-ingang. Dit schema is getekend in de onderstaande figuur. Over de weerstand R_{abc} staat een spanning die 0,65 V kleiner is dan de negatieve voedingsspanning. Aan de hand van deze wetenschap en de gewenste I_{abc} kunt u de waarde van de weerstand berekenen. Let op dat deze weerstand naar de massa gaat!



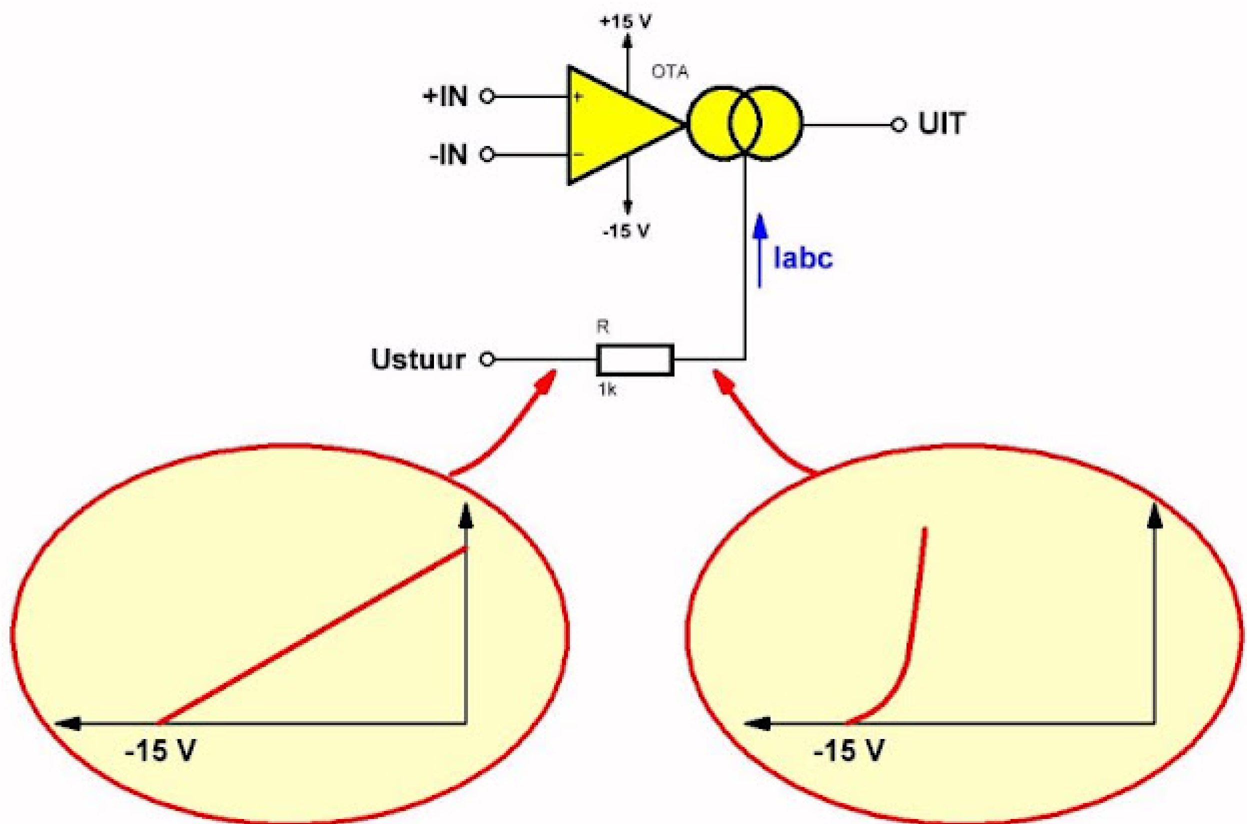
Het instellen van de stuurstroom op een vaste waarde. (© 2019 Jos Verstraten)

Instellen met een potentiometer
Met het in de onderstaande figuur getekende schema kunt u de stuurstroom instelbaar maken. Staat de loper van de potentiometer aan de $-U_b$, dan is de stuurstroom uiteraard gelijk aan nul. De transconductantie van de OTA is dan ook nul, met als gevolg ook de uitgangsstroom. Naarmate u de loper naar de massa verplaatst neemt de stuurstroom toe en daarmee ook de uitgangsstroom van de OTA.



Het instellen van de stuurstroom met een potentiometer. (© 2019 Jos Verstraten)

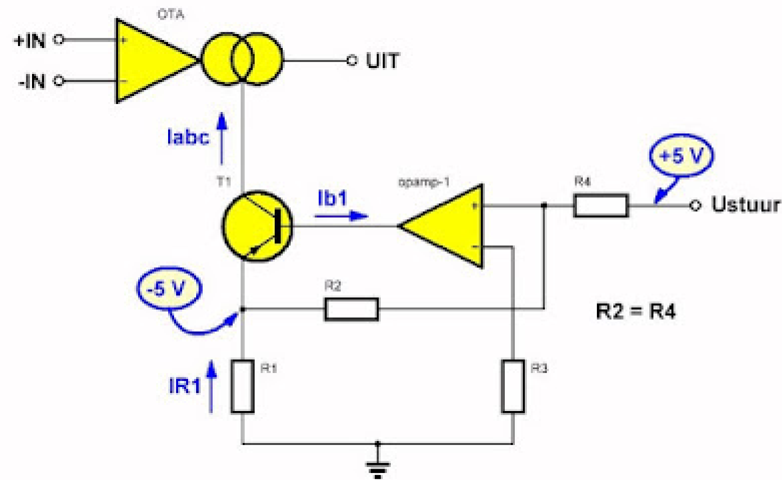
Instellen met een stuurspanning
In de meeste schakelingen waar u 'iets' moet regelen zal een stuurspanning beschikbaar zijn. U kunt deze stuurspanning volgens het schema van de onderstaande figuur omzetten in een stuurstroom voor de OTA. De waarde van de stuurspanning moet liggen tussen de waarde van de negatieve voedingsspanning en de massa. De waarde van de weerstand wordt berekend aan de hand van de minimale waarde van de stuurspanning en de maximale waarde van de gewenste I_{abc}.
Bij het werken met dit systeem mag u niet vergeten dat tussen de I_{abc}-ingang en de negatieve voeding intern een diode staat. De spanning op de linker aansluiting van de weerstand R_{abc} verloopt lineair van 0 naar -15 V. De spanning op de rechter aansluiting van de weerstand R_{abc} verloopt echter van -15 naar -14,35 V! Dit uiteraard als u de schakeling voedt met een spanning van ±15 V. Als de externe stuurspanning dus in de buurt van de negatieve voedingsspanning zit, zal er geen lineair verband bestaan tussen de spanning en de stroom. Voor sommige toepassingen is dat zeer vervelend, zo niet ontoelaatbaar.
De waarde van de stroom I_{abc} wordt gegeven door de uitdrukking:
I_{abc} = [U_b - 0,65 V - U_{stuur}] / R1



Het omzetten van een externe stuurspanning in een stuurstroom. (© 2019 Jos Verstraten)

Instellen met een stroombron

Het beste systeem voor het regelen van de stuurstroom van de OTA is getekend in de onderstaande figuur. Bij deze methode wordt uitgegaan van een spanningsgestuurde stroombron. De I_{abc}-ingang wordt gevoed door de transistor T1. In de emitter van deze transistor staat een stroomsensorweerstand R1. De spanning over deze weerstand wordt door een operationele versterker vergeleken met de externe stuurspanning U_{stuur}.
De werking van de schakeling is als volgt. De inverterende ingang van de operationele versterker wordt via de weerstand R4 ingesteld op 0 V. De operationele versterker zal er naar streven de spanning op de niet-inverterende ingang ook op 0 V in te stellen. De externe stuurspanning, in het voorbeeld +5 V, stuurt door de weerstand R4 een bepaalde stroom. Deze stroom kan alleen via de weerstand R2 afvloeien. De ingang van de operationele versterker heeft immers een zeer hoge weerstand. Over de weerstand R2 valt dezelfde spanning als over de weerstand R1. Het gevolg is dat de emitter van de transistor op een spanning van -5 V staat. De stroom I_{R1} door de emitterweerstand wordt dus alleen bepaald door de waarde van die weerstand en door de grootte van de stuurspanning. In formulevorm:
$I_{abc} = U_{stuur} / R1$
Als u de waarde van de basisstroom verwaarloost (hetgeen bij transistoren met een hoge versterkingsfactor zonder meer mag) is I_{R1} gelijk aan I_{abc}.



Het instellen van de I_{abc} met behulp van een stroombron. (© 2019 Jos Verstraten)

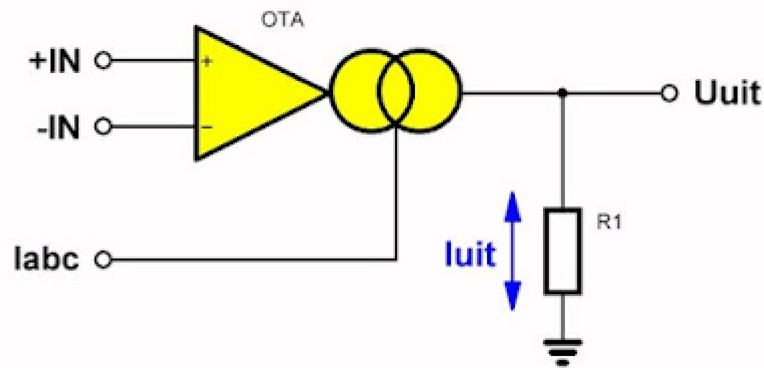
Groot voordeel
Het voordeel van deze schakeling is dus dat er een absoluut lineair verband bestaat tussen de waarde van de externe stuurspanning en de waarde van de stuurstroom I_{abc}. Deze schakeling is dan ook de beste die u kunt bedenken voor het door middel van een stuurspanning regelen van de eigenschappen van de OTA.

De uitgangsschakelingen van de OTA

Inleiding
Zoals reeds geschreven levert een OTA een stroom aan de belasting of trekt een stroom uit de belasting. In de meeste praktische toepassingen kunt u echter niet erg veel aanvangen met een stroom. De meeste schakelingen wensen nu eenmaal aangestuurd te worden met een spanning in plaats van met een stroom. Vandaar dat u de uitgang van de OTA moet afsluiten met een schakeling die de stroom omzet in een spanning. Bovendien zal deze schakeling ook iets moeten doen aan de uitzonderlijk hoge uitgangsimpedantie van de OTA. Ook voor dit probleem bestaan verschillende oplossingen, die in de volgende paragrafen in het kort worden beschreven.

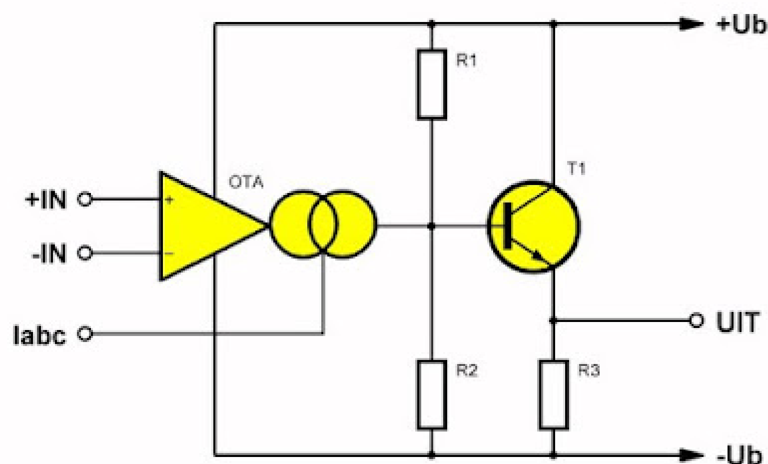
Afsluiten met een weerstand
De meest eenvoudige oplossing is uiteraard, zoals getekend in de onderstaande figuur, het afsluiten van de OTA met een weerstand naar de massa. De uitgangsstroom van de OTA vloeit af door de weerstand en bouwt over dit onderdeel een spanning op. De waarde van de uitgangsspanning is gelijk aan:
$U_{uit} = I_{uit} \bullet R1$
Vult u deze uitdrukking in de formule in die de overdrachtsverhouding van de OTA definieert, dan ontstaat:
$U_{uit} = X \bullet I_{abc} \bullet \Delta U_{in} \bullet R1$
Aan de hand van deze uitdrukking kunt u de spanningsversterking van de OTA bepalen. De spanningsversterking A_v is immers de verhouding tussen de uitgangsspanning en de ingangsspanning van een schakeling.
In dit geval is:
$A_v = U_{uit} / U_{in}$
$A_v = X \bullet I_{abc} \bullet R1$
In deze formule moet u de waarde van de stroom in mA en de waarde van de weerstand in kΩ invullen.
Zoals de meeste eenvoudige schakelingen heeft ook deze een belangrijk nadeel. Als de schakeling rond de OTA belast wordt met een tweede schakeling zal deze de uitgang van de OTA beïnvloeden. De ingangsimpedantie van deze schakeling staat immers parallel aan de belastingsweerstand R1 van de OTA. De uitgangsstroom van de OTA gaat nu gedeeltelijk

afvloeien via deze ingangsimpedantie, met als gevolg dat de versterking daalt.



Het afsluiten van de uitgang van de OTA met een weerstand. (© 2019 Jos Verstraten)

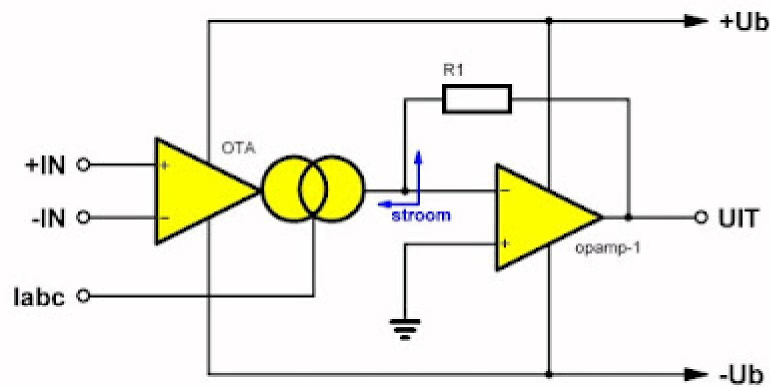
Afsluiten met een emittervolger
De bezwaren tegen het afsluiten met een weerstand kunt u ondervangen door een emittervolger aan de uitgang te koppelen. Een dergelijk schema is getekend in de onderstaande figuur. De twee weerstanden R1 en R2 vormen de primaire belasting van de OTA. De spanning die op het knooppunt van beide weerstanden ontstaat stelt de basis van de transistor T1 op een bepaalde spanning in. Deze spanning wordt door de transistorwerking overgezet naar de emitter. Over R3 staat een uitgangsspanning, die met een vrij lage impedantie ter beschikking staat van de volgende schakeling. Hoewel deze schakeling al veel beter is dan deze met een enkelvoudige weerstand, is zij toch niet geschikt voor nauwkeurige toepassingen. Dan gaat namelijk de temperatuursdrift van de transistor een te belangrijke rol spelen.



Het afsluiten van een OTA met een emíttervolger. (© 2019 Jos Verstraten)

Afsluiten met een stroom-naar-spanning omzetter
De meest ideale oplossing voor het afsluiten van een OTA is geschetst in de onderstaande figuur. De OTA wordt nu afgesloten met een operationele versterker, die geschakeld is als stroom-naar-spanning omzetter. De niet-inverterende ingang van de operationele versterker ligt aan de massa. De op-amp zal zich dus zo instellen dat ook de inverterende ingang aan de massa ligt. De uitgangsstroom van de OTA vloeit naar de inverterende ingang en kan vandaar alleen maar verder afvloeien via de weerstand R1.
De stroom wekt over deze weerstand een spanning op, waarvan de waarde te berekenen valt met de wet van Ohm. Omdat de linker aansluiting van de weerstand op massa-potentiaal staat, vindt u de spanningsval over de weerstand volledig terug op de uitgang van de operationele versterker. Vanwege de grote eigen versterking van deze schakeling zal de uitgangsspanning ter beschikking staan met een zeer lage uítgangsimpedantie. De belasting van de trap beïnvloedt de werking van de OTA nu niet meer, zodat de schakeling volledig

geïsoleerd is van de volgende schakeling.



Het afsluiten van een OTA met een stroom-naar-spanning omzetter. (© 2019 Jos Verstraten)

Kennismaking met de CA3080 en NTE996 OTA's

De voorgeschiedenis

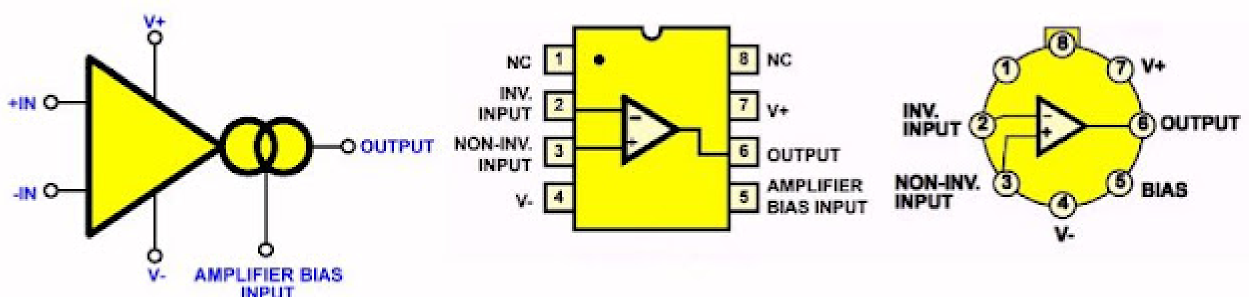
De CA3080 schakeling werd ontwikkeld door RCA in 1969 en nadien door diverse halfgeleiderfabrikanten zoals Harris Semiconductor, Intersil en NatSemi als second source aangeboden onder namen als LM3080 en µA3080. In de tijd van de grote reorganisaties van de diverse halfgeleiderfabrikanten kwam RCA elders terecht en werden de oude, volledig versleten fabricagelijnen afgebroken. De CA3080 en de meeste andere leden van de CA-familie van RCA werden *'obsolete'* verklaard. Toen er vanuit de industrie toch nog veel vraag was naar een *'replacement'* besloot het Amerikaanse bedrijf Rochester Electronics de bij Intersil nog resterende wafers op te kopen en deze in eigen productie weer als CA3080 op de markt te brengen.

Bovendien heeft het Amerikaanse bedrijf NTE Electronics een alternatieve schakeling ontwikkeld die volledig compatibel is en onder de naam NTE996 wordt aangeboden.

De schakelingen worden nu verkocht voor prijzen vanaf € 2,30 tot € 10,00. Goed zoeken op Google naar een goedkope leverancier is dus aan te bevelen!

De behuizingen

De CA3080 wordt geleverd in TO-5 en in DIL-8 behuizingen. De aansluitgegevens in bovenaanzicht zijn samengevat in de onderstaande figuur. Bij de versie in metalen TO-5 behuizing is pen 4 verbonden met deze behuizing. De NTE996 is uitsluitend in de DIL-versie leverbaar.

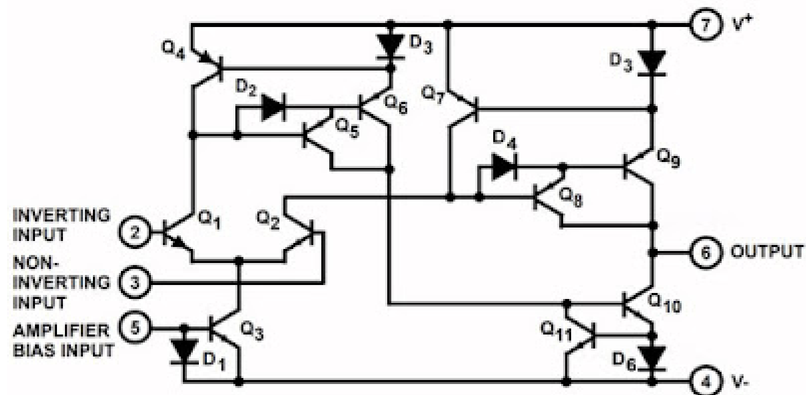


Symbool en aansluitgegevens van de CA3080 en NTE996. (© 2019 Jos Verstraten)

Het interne schema van de CA3080

In de onderstaande figuur is de volledig interne schakeling van dit IC weergegeven. Merk op dat pen 5, de *'Amplifier Bias Input'* uitsluitend via de diode D1 is verbonden met de negatieve voedingsaansluiting en dat u dus erg goed moet weten waarop u deze pen aansluit. Sluit u bijvoorbeeld deze pen, al is het maar even, kort naar de massa dan gaat er zo'n grote stroom

door de diode vloeien dat de chip onmiddellijk defect raakt.



Het intern schema van de CA3080. (© Harris Semiconductor)

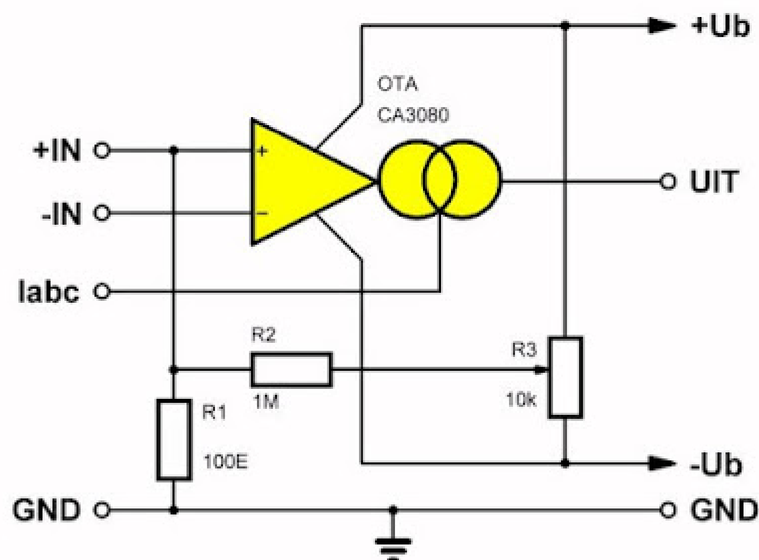
De specificaties van de CA3080

- **Voedingsspanning:** ±18 V max.
- **Offsetspanning aan de ingangen:** ±5 mV max.
- **Offsetstroom aan de ingangen:** ±0,6 µA max.
- **Transconductantie (g_m)**: 9.600 µmho typisch
- **Uitgangsstroom:** ±500 µA max.
- **Uitgangsspanning:** ±12,0 V max.
- **Slewrate:** 75 V/µs max.
- **Open-loop bandbreedte:** 2 MHz typisc
- **Ingangscapaciteit:** 3,6 pF typisch
- **Uitgangscapaciteit:** 5,6 pF typisch
- **Uitgangsweerstand:** 15 MΩ typisch
- **Ingang-naar-uitgang capaciteit:** 0,024 pF typisch
- **Propagation delay:** 45 ns typisch
- **X-factor:** 19,2

Offsetcompensatie van de CA3080

Compensatie op één ingang

De ingangskring bestaat bij de CA3080 uit een verschilversterker. Als tussen beide ingangen geen spanningsverschil aanwezig is zal de schakeling geen stroom leveren aan de uitgang. Maar die wetmatigheid wordt in de praktijk beïnvloedt door de offset van de ingangskring. Het volstaat namelijk dat beide transistoren van de ingangstrap iets afwijkende basis/emitter-spanningen hebben of de stelling gaat niet meer op. Bovendien zit u bij OTA's met de beperking dat de ingangsspanningen hoogstens 20 mV groot mogen zijn. Offsetfouten spelen dan ook bij deze schakelingen een veel grotere rol dan bij operationele versterkers. Bij heel veel toepassingen zult u dan ook een compensatie voor deze offset moeten aanbrengen. In de onderstaande figuur is een eenvoudige compensatieschakeling getekend, die u bij iedere OTA kunt toepassen.
Door middel van een tussen de beide voedingsspanningen geschakelde instelpotentiometer R3 wordt een spanning via de grote weerstand R2 aangeboden aan de kleine weerstand R1. Deze is geschakeld tussen de massa en de niet-inverterende ingang. Let op de verhouding tussen beide weerstanden! De spanningsdeler R1/R2 zorgt ervoor dat van de voedingsspanning maar een paar mV over blijft.

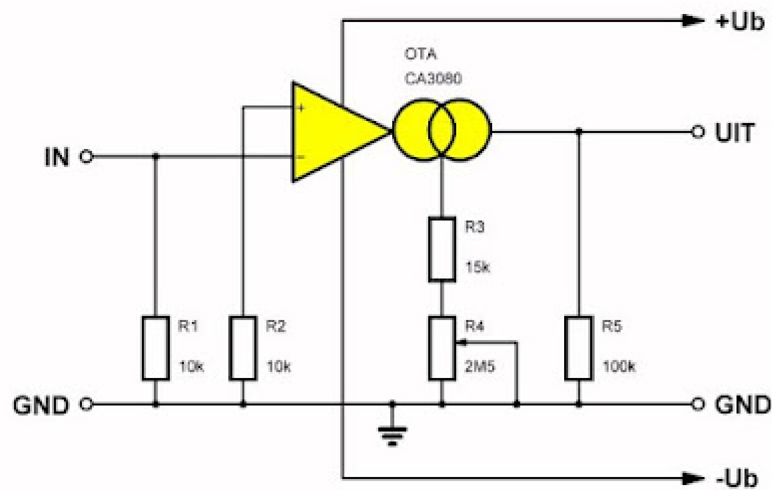


Eenvoudige offsetcompensatie op één ingang van de CA3080. (© 2019 Jos Verstraten)

Afregelen van de offset
Het afregelen van de offsetcompensatie gaat bij OTA's echter fundamenteel anders dan bij operationele versterkers. Voor het afregelen van de instelpotentiometer moet u de stuurstroom I_{abc} op nul instellen. Uiteraard worden ook de ingangsspanningen verwijderd. Vervolgens meet u de gelijkspanning op de uitgang van de OTA. Nadien stelt u de I_{abc} in op de maximale waarde die in de schakeling van toepassing is. U verdraait vervolgens de loper van de potentiometer tot u dezelfde gelijkspanning op de uitgang van de OTA meet.

De CA3080 als spanningsversterker

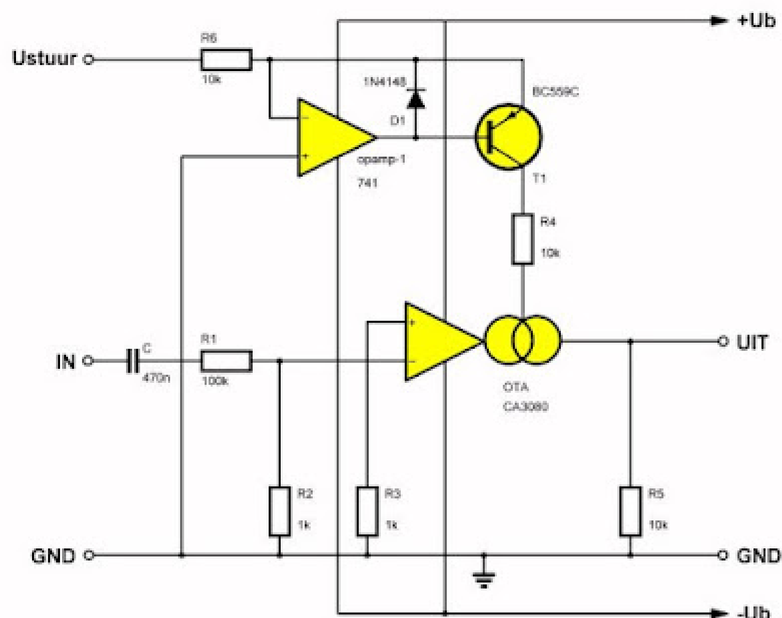
Een eenvoudige schakeling
In de onderstaande figuur is de schakeling gegeven van een eentraps wisselspanningsversterker. Met deze schakeling kunt u kleine wisselspanningen, bijvoorbeeld van elektreet-microfoons, versterken waarbij de versterkingsfactor instelbaar is met behulp van de potentiometer R4. Het ingangssignaal, dat een maximale waarde van 20 mV top-tot-top mag hebben, wordt aangeboden aan de inverterende ingang van de OTA. Beide ingangen worden afgesloten met weerstanden van 10 kΩ naar de massa. Daardoor wordt de sterk wisselende ingangsimpedantie van de OTA vastgelegd op een constante waarde. Dat is een voorwaarde voor het goed afsluiten van een microfoon. De uitgang wordt afgesloten met een weerstand van 100 kΩ.
De I_{abc}-ingang wordt gevoed uit de serieschakeling van de vaste weerstand R3 en de potentiometer R4. Is deze potentiometer ingesteld op 0 Ω, dan wordt de stuurstroom alleen bepaald door de weerstand R3 en met een voedingsspanning van 15 V wordt de maximale stuurstroom dan ongeveer 1 mA. U kunt de spanningsversterking van de schakeling berekenen deze formule:
$A_v = 19{,}2 \bullet I_{abc} \bullet R5$
$A_v = 1.920$
Een vrij forse versterkingsfactor, die tot gevolg heeft dat een ingangssignaal van 1 mV als ongeveer 2 V op de uitgang verschijnt! Wordt de potentiometer volledig in de schakeling gedraaid, dan daalt de versterkingsfactor tot ongeveer 11,5.



Een versterker voor kleine wisselspanningssignalen. (© 2019 Jos Verstraten)

Voordeel
Het grote voordeel van deze schakeling is dat het te versterken signaal niets te maken heeft met de potentiometer die de versterking van de schakeling instelt. Zeker bij het versterken van kleine signalen is het altijd een probleem om dit signaal door een potentiometer te sturen. In de meeste gevallen wordt brom, ruis en lopergekraak opgepikt en mee versterkt. Hier kan daar geen sprake van zijn!

Een spanningsgestuurde versterker
Een CA3080 is ideaal voor het maken van een spanningsgestuurde versterker. In de onderstaande figuur is het basisschema van een dergelijke toepassing getekend. De Bias Control Input van de CA3080 wordt gestuurd uit een regelbare stroombron. Deze is opgebouwd uit de opamp-1 en de transistor T1. Aan de ingang U_{stuur} kunt u een gelijkspanning tussen 0 V en +5 V aanleggen. Deze spanning wordt omgezet in een stroom die de I_{abc} voor de OTA vormt. De ingangsspanning wordt weer flink gereduceerd door de spanningsdeler R1/R2.



Het basisschema van een spanningsgestuurde versterker. (© 2019 Jos Verstraten)

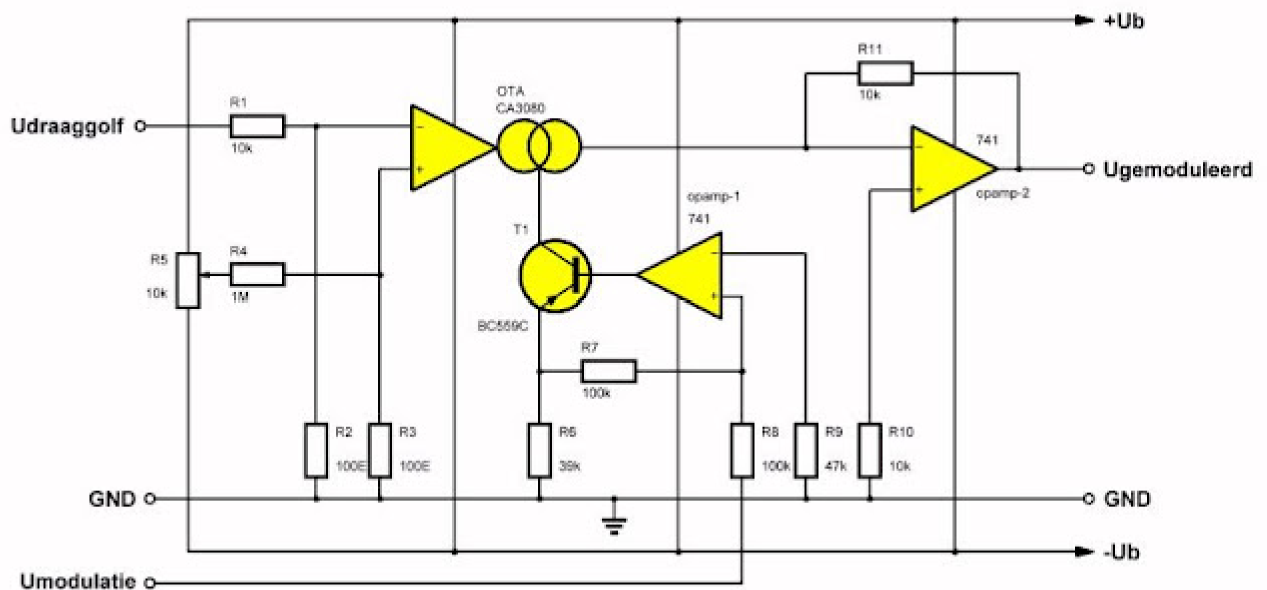
Een ideale elektronische verzwakker
Besluitend kunt u stellen dat deze trap een ideale elektronisch verzwakker vormt, met een instelbereik van meer dan 60 dB. U kunt deze schakeling bijvoorbeeld gebruiken als volume-insteller in mengpanelen. U kunt dan iedere ingangsversterker afzonderlijk met een gelijkspanning regelen, terwijl een master-fader ingebouwd kan worden die een

regelspanning naar alle voortrappen stuurt.

Kwalitatief hoogwaardige amplitude-modulator
Tot slot van deze praktische versterkerschakelingen rond de CA3080 geeft de onderstaande figuur het schema van een kwalitatief uitstekende amplitude-modulator. Het in amplitude moduleren van een signaal komt uiteraard neer op het regelen van de versterking van het signaal. Vandaar dat een amplitude-modulator in feite niets anders is dan een versterker waarvan de versterkingsfactor door een regelspanning instelbaar is.
In dit schema worden geen compromissen gesloten. Alle deelschakelingen worden op de allerbeste manier samengesteld. Het resultaat is een zeer goede spanningsgestuurde versterker, waarvan de versterking instelbaar is tussen 0 en 1 door middel van een modulatiespanning tussen 0 V en +15 V. Een dergelijke amplitude-modulator heeft tal van interessante toepassingen. Te denken valt aan:

- Tremolo, gemoduleerd met een sinus met een frequentie van ongeveer 5 Hz.
- Regelbare versterkertrap in ruisonderdrukkers.
- Synthesizer bouwsteen.
- Automatische begrenzer in PA-systemen.
- Automatische microfoon-fader.

De stuurspanning $U_{modulatie}$ wordt door middel van een spanning-naar-stroom omzetter uiterst lineair omgezet in de I_{abc} voor de OTA. Daarvoor zijn opamp-1 en T1 verantwoordelijk. De uitgangsstroom van de OTA wordt door middel van een stroom-naar-spanning omzetter opamp-2 omgezet in een uitgangsspanning met een zeer lage uitgangsimpedantie.
Met behulp van R5 kunt u de offset van de schakeling compenseren. Het ingangssignaal wordt door middel van de spanningsdeler R1/R2 met een factor 100 verzwakt, zodat ingangsspanningen tot 2 V probleemloos verwerkt kunnen worden.
De spanning-naar-stroom omzetter aan de uitgang verzorgt weer de noodzakelijke versterking om de totale versterking van de schakeling op één te brengen.

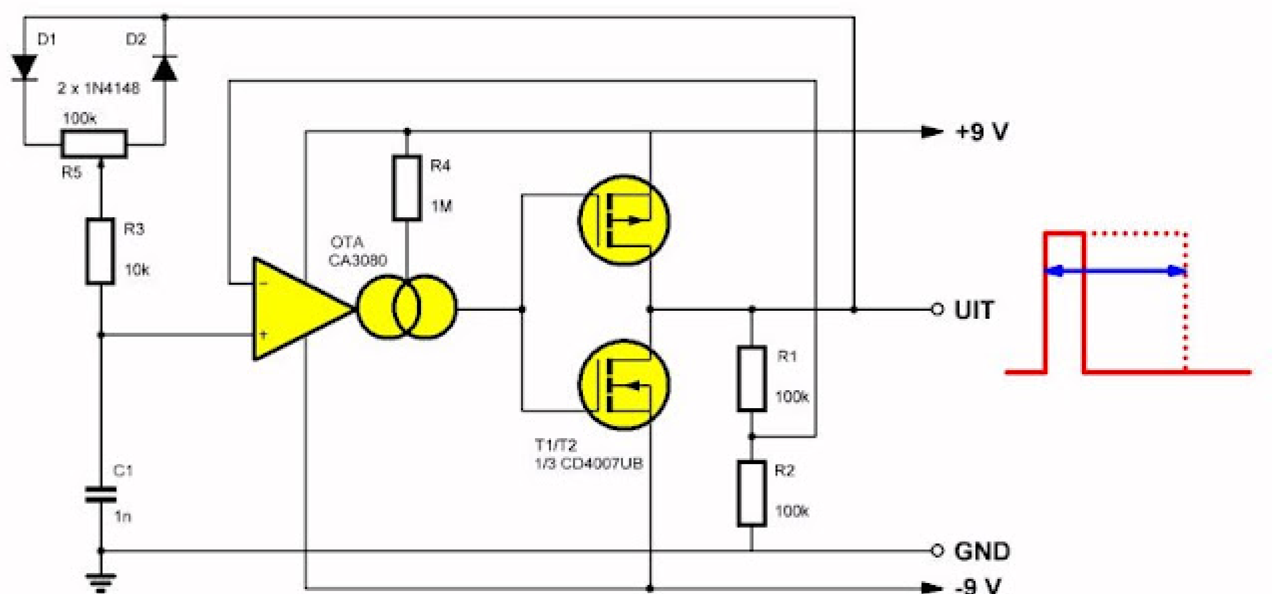


Het schema van een kwalitatief uitstekende amplitude-modulator. (© 2019 Jos Verstraten)

De CA3080 als oscillator

Een AMV met regelbare duty-cycle
In de onderstaande figuur is het schema getekend van een astabiele multivibrator (AMV), waarvan de duty-cycle of de aan/uit-verhouding over een breed gebied regelbaar is. De werking van de schakeling is als volgt. De niet-inverterende ingang van de OTA wordt door middel van een condensator met de massa verbonden. Dit onderdeel bepaalt de frequentie waarop de schakeling oscilleert. De condensator wordt opgeladen en ontladen uit de

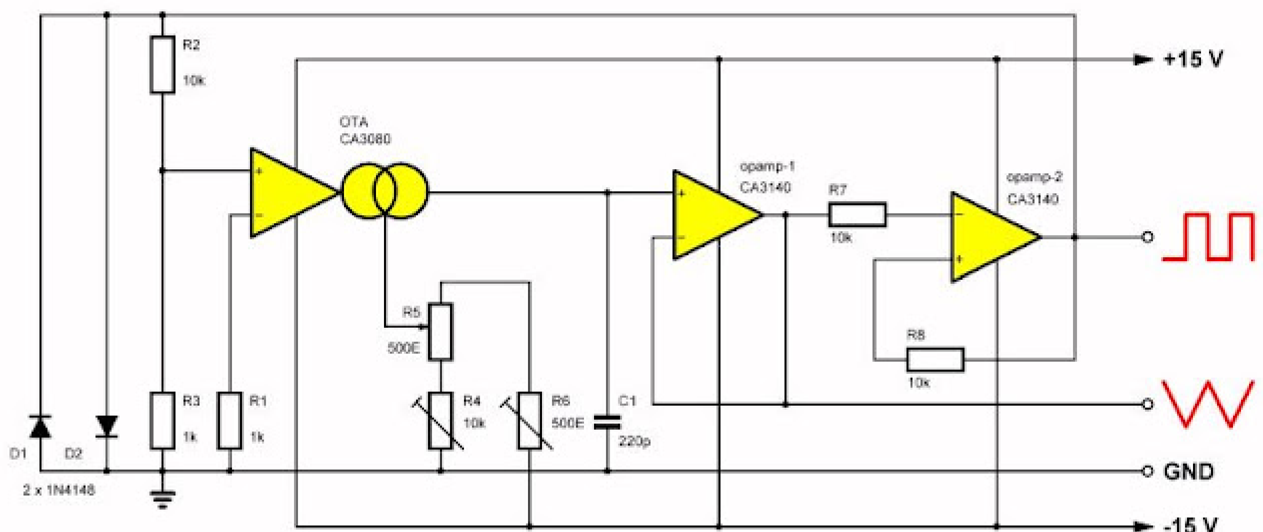
uitgangsspanning van de schakeling. Er zijn hiervoor twee stroomkringen aanwezig. Enerzijds vloeit stroom via de weerstand R3, het linker deel van de potentiometer R5 en de diode D1. Anderzijds vloeit stroom via de weerstand R3, het rechter deel van de potentiometer R5 en de diode D2. De dioden bepalen de richting van de stroom. Het zal duidelijk zijn dat de diode D1 de laadstroom levert en de diode D2 de ontlaadstroom. Als de uitgangsspanning van de schakeling 'H' is, dan zal er uit deze hoge spanning een laadstroom via D1 naar de condensator vloeien. Is de uitgangsspanning 'L', dan zal er een ontlaadstroom vloeien uit de condensator via de diode D2.
Rest nog de vraag hoe de uitgangsspanning omschakelt van 'L' naar 'H' en van 'H' terug naar 'L'. Daarvoor is de terugkoppeling tussen de uitgang en de inverterende ingang verantwoordelijk. De OTA is namelijk geschakeld als comparator. De schakeling vergelijkt de spanning over de condensator met een drempel op de inverterende ingang. Die terugkoppeling zorgt er nu voor dat de drempelspanning op de inverterende ingang ofwel hoger, ofwel lager is dan de condensatorspanning. De condensator gaat dan ofwel opladen naar de hogere drempelwaarde ofwel ontladen naar de lagere drempelwaarde.
Het zal duidelijk zijn dat u de verhouding tussen de laad- en de ontlaadstroom over een zeer breed bereik kunt instellen door de loper van de potentiometer R5 te verdraaien. Staat deze in de middenstand, dan zijn laad- en ontlaadstroom aan elkaar gelijk en zal het laden naar de bovenste drempel even lang duren als het ontladen naar de onderste drempel. De schakeling levert dan een mooie symmetrische blokspanning af. Zet u de loper van de potentiometer in de meest linkse stand, dan zal de laadstroom veel groter zijn dan de ontlaadstroom. De schakeling wekt dan zeer smalle positief gerichte naaldpulsjes op. In het andere geval (loper helemaal rechts) is de ontlaadstroom veel groter dan de laadstroom en wekt de schakeling negatief gerichte naaldpulsjes op.



Een astabiele multivibrator met regelbare puls/pauze-verhouding. (© 2019 Jos Verstraten)

Spanningsgestuurde functiegenerator
Een functiegenerator is, in de meest primitieve vorm, een schakeling die rechthoek- en driehoekvormige signalen genereert. OTA's zijn ideale IC's voor het ontwerpen van spanningsgestuurde functiegeneratoren. De driehoek wordt immers altijd gevormd door een condensator door middel van twee even grote maar tegengestelde stromen op te laden en nadien weer te ontladen. Het zal duidelijk zijn dat OTA's, met hun stroomuitgang, ideale schakelingen voor dit doel zijn. Het basisschema van een spanningsgestuurde functiegenerator met OTA is getekend in de onderstaande figuur.
De uitgangsstroom van de OTA laadt of ontlaadt de condensator C1. De spanning over dit onderdeel zal dus lineair stijgen of dalen, afhankelijk van de richting van de uitgangsstroom van de OTA. Deze richting wordt bepaald door een terugkoppeling, die is aangebracht tussen de uitgang van de schakeling en de niet-inverterende ingang van de OTA. De operationele versterker opamp-1 is als buffer geschakeld. Deze trap zorg ervoor dat de condensator met

een zeer hoge impedantie wordt afgesloten, zodat het lineaire op- en ontladen van de condensator niet verstoord wordt door de belasting van de condensator. De spanning op de uitgang van de buffer is gelijk aan de spanning over de condensator. Opamp-2 is als comparator geschakeld. Deze stelt vast wanneer de spanning over de condensator gelijk wordt aan vooraf bepaalde grenzen. Op dat moment schakelt de uitgang van de comparator om en de reeds genoemde terugkoppeling zorg ervoor dat de OTA omschakelt van laden naar ontladen of van ontladen naar laden.
Stel dat de uitgangsspanning van de comparator positief is. Deze spanning wordt door de geleidende diode D2 begrensd op +0,65 V. Deze spanning gaat, via de spanningsdeler R2/R3, naar de niet-inverterende ingang van de OTA. De negatieve ingang van deze schakeling ligt aan de massa. Het gevolg is dat de OTA een positieve uitgangsstroom genereert. De uitgang zal dus een constante stroom leveren aan de belasting. Die belasting wordt gevormd door de condensator C1. Een condensator, die met een constante stroom wordt geladen, zal een lineaire spanningsstijging vertonen.
De spanning over de condensator zal dus zaagtandvormig stijgen. Deze stijgende spanning wordt via de buffer opamp-1 aangeboden aan de inverterende ingang van de als comparator geschakelde operationele versterker opamp-2. De niet-inverterende ingang van deze operationele versterker is via de weerstand R8 verbonden met de uitgang. Deze ingang staat dus op een spanning van +0,65 V. Op het moment dat de condensatorspanning groter wordt dan deze waarde klapt de comparator om. De uitgang wordt negatief en deze negatieve spanning wordt via de diode D1, die nu gaat geleiden, begrensd op een spanning van -0,65 V. Deze negatieve spanning komt via de spanningsdeler R2/R3 op de niet-inverterende ingang van de OTA terecht. De spanning op deze ingang wordt negatief ten opzichte van de spanning op de inverterende ingang. De OTA gaat nu een negatieve stroom leveren. Dat wil zeggen dat de uitgang stroom gaat trekken uit de belasting. Omdat de absolute waarden van de spanningen aan de ingang niet veranderd zijn zal deze stroom, alweer in absolute waarde, even groot zijn dan de positieve stroom. De condensator wordt dus nu ontladen met een even grote stroom en de spanning over het onderdeel zal even snel dalen. Dit verschijnsel gaat door tot de spanning over de condensator ontladen is tot -0,65 V. Dan slaat de comparator IC3 weer om en het systeem begint aan een nieuwe periode.



De basisschakeling van een spanningsgestuurde functiegenerator met een OTA. (© 2019 Jos Verstraten)

Conclusie
Over de condensator C1 ontstaat een mooie driehoekvormige spanning, die varieert tussen de grenzen -0,65 V en +0,65 V. Op de uitgang van opamp-2 staat een mooie blokvormige spanning met dezelfde maximale en minimale waarde. De grootte van de laad- en de ontlaadstromen wordt uiteraard mede bepaald door de grootte van de I_{abc} van de OTA. Deze stroom kunt u instellen door de loper van de potentiometer R5 te verdraaien. De twee instelpotentiometers R4 en R6 kunt u gebruiken om de onderste en bovenste frequentie van de schakeling in te stellen.

Met een dergelijke schakeling kunt u zonder al te grote schakeltechnische problemen een frequentiebereik van 1 op 10.000 realiseren. Hetgeen in de praktijk betekent dat u met één draai aan de potentiometer het volledige audio-bereik van 5 Hz tot 50 kHz kunt sweepen!

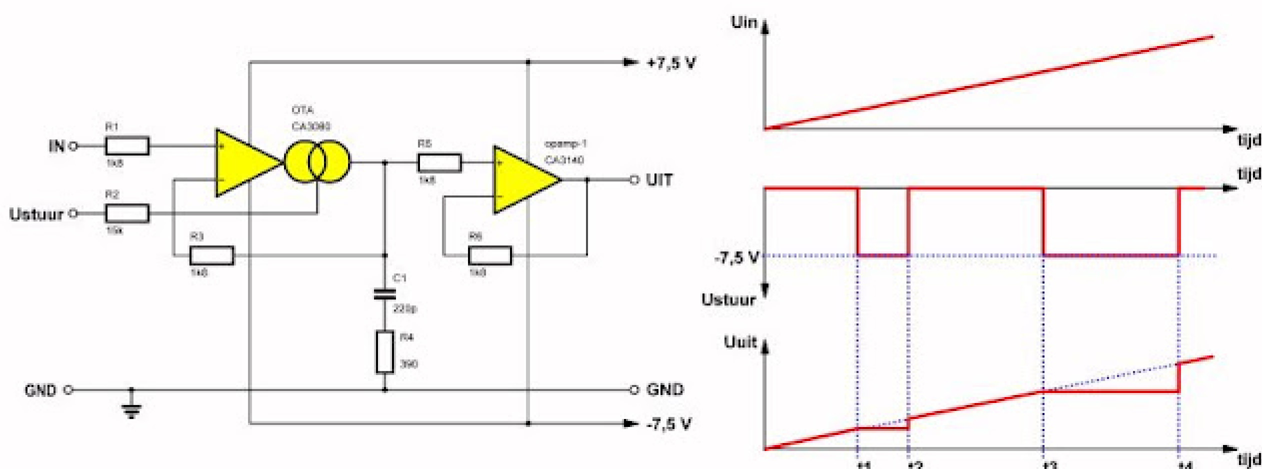
De CA3080 in diverse schakelingen

Inleiding

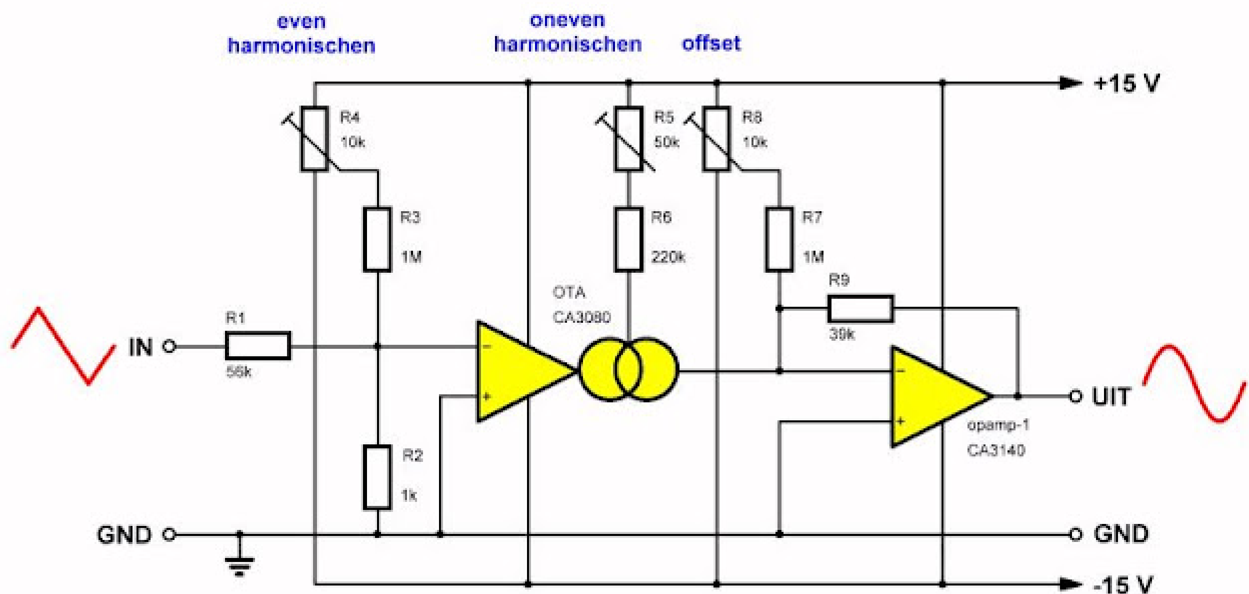
In deze paragraaf worden enige zeer uiteenlopende toepassingen van de CA3080 beschreven. Een bewijs te meer hoe universeel bruikbaar deze schakeling is.

Sample-and-hold schakeling

Een sample-and-hold, afgekort tot S&H, is een schakeling die de momentele grootte van een analoge spanning even kan vasthouden. U kunt een S&H dus een analoog geheugen noemen. Sample-and-hold schakelingen zijn onmisbaar als u analoge signalen in een ADC wil omzetten in een digitale code. De S&H neemt dan eerst even een monstertje van het analoge signaal. De ADC zal nadien de grootte van dit monstertje meten en er een digitale code uit afleiden die een maat is voor de gemeten signaalgrootte.
In de onderstaande figuur is het basisschema getekend van een met een CA3080 opgebouwde S&H. De schakeling maakt gebruik van het groot regelbereik van de uitgangsimpedantie van een OTA. Is de I_{abc} maximaal, dan is de uitgangsimpedantie relatief laag. Is de stroom echter nul, dan stijgt de praktische uitgangsimpedantie van de schakeling tot wel 1.000 MΩ. Deze zeer grote variatie in uitgangsimpedantie kunt u vergelijken met een schakelaar, die geopend of gesloten wordt op bevel van de I_{abc}. Wordt de stuuringang aangesloten op een spanning van 0 V, dan zal de schakeling een maximale I_{abc} trekken. De kleine condensator C1 wordt dan via de vrij lage uitgangsimpedantie van de OTA opgeladen tot de momentele waarde van de ingangsspanning. De spanning over de condensator zal bovendien de variatie van de ingangsspanning getrouw volgen.
Maakt u de stuuringang echter negatief, dan valt de stuurstroom terug tot nul. De uitgangsimpedantie wordt dan meer dan 1 GΩ en de condensator wordt als het ware losgekoppeld van de rest van de schakeling. De spanning over de condensator kan nu niet afvloeien en blijft dus vrij constant. Op dat moment moet u de op de schakeling aangesloten ADC opdracht geven om het in de condensator opgeslagen ingangsmonster om te zetten in een digitale code.
De terugkoppeling van de uitgang naar de ingang zorgt ervoor dat de schakeling in staat is grotere amplitudes dan 10 mV zonder problemen te verwerken. De inverterende ingang volgt nu immers de spanning op de niet-inverterende ingang waardoor er een minimaal spanningsverschil tussen beide ingangen optreedt, zelfs als de schakeling wordt gestuurd met signalen in de grootte-orde van volts.
De sample-condensator C1 moet uiteraard met een als buffer geschakelde operationele versterker worden afgesloten. Deze buffer zorgt ervoor dat de kleine lading op de condensator niet via de belastingsweerstand kan afvloeien naar de massa.



Driehoek naar sinus omzetter
Een belangrijke toepassing van de CA3080 is het omzetten van driehoeken in sinussen. Een dergelijke trap hebt u steeds in een analoge functiegenerator nodig, want uiteraard wilt u dat een dergelijke generator naast de driehoeken en rechthoeken ook in staat is sinusvormige spanningen te genereren. Meestal gebruikt men voor het omzetten van een driehoek in een sinus ingewikkelde weerstand/diode-netwerken in de terugkoppeling van een operationele versterker. De dioden schakelen, naarmate de driehoekspanning aan de ingang stijgt, steeds meer weerstanden in de terugkoppelkring, waardoor de versterking van de op-amp daalt en de toppen van de driehoek worden afgerond. Op deze manier ontstaat aan de uitgang van de schakeling een benaderde sinusspanning, waarop evenwel nog een vrij grote harmonische vervorming zit.
Hetzelfde kunt u echter veel eenvoudiger doen met één OTA, zie het schema van de onderstaande figuur. De driehoek, die een top-tot-top waarde van 10 V moet hebben (let het woordje moet!), wordt eerst door de spanningsdeler R1/R2 gereduceerd tot ongeveer 100 mV. Deze spanning wordt op de inverterende ingang van de OTA gezet. De niet-inverterende ingang van de OTA ligt aan de massa, met als gevolg dat de OTA flink overstuurd wordt.
De uitgangsstroom wordt op de gebruikelijke manier omgezet in een uitgangsspanning. Door het oversturen van de schakeling zal de uitgangsstroom en dus ook de uitgangsspanning min of meer sinusvormig gaan verlopen. De versterking van de schakeling is zo ingesteld, dat ook de sinus op de uitgang een top-tot-top waarde heeft van 10 V. Door het instellen van de I_{abc} en de offset kunt u de vervorming op de sinus minimaliseren. Met de getekende schakeling zijn in het Vego-lab minimale vervormingspercentages van 2 á 4 % gehaald, voorwaar niet slecht voor een dergelijke eenvoudige schakeling! Een en ander blijkt ook tamelijk afhankelijk te zijn van de exemplarische spreiding op de karakteristieken van de gebruikte OTA.



Een eenvoudige driehoek-naar-sinus omzetter. (© 2019 Jos Verstraten)

Analoge vermenigvuldiger met een CA3080
Analoge vermenigvuldigers voldoen aan de uitdrukking:
$U_z = U_x \bullet U_y$
waarbij U_x en U_y de spanningen op de twee ingangen zijn. Analoge vermenigvuldigers zijn nuttige schakelingen als u bijvoorbeeld een vermogensmeter wilt ontwerpen. Ook het in een verbruiker gedissipeerde vermogen is immers gelijk aan een product, want gelijk aan het product van spanning over de verbruiker en stroom door de verbruiker:
$P = U \bullet I$
waarbij het vermogen P in watt wordt uitgedrukt.
Er bestaan speciale geïntegreerde analoge vermenigvuldigers, maar die schakelingen zijn duur en zeldzaam. Gelukkig kan het ook met een OTA! Het basisprincipe is getekend in de

onderstaande figuur. De niet-inverterende ingang van de OTA ligt aan de massa. Een van de te vermenigvuldigen spanningen gaat naar de inverterende ingang. De tweede ingangsspanning stuurt de I_{abc}-ingang. Aan de hand van de algemene overdrachtsformule van een OTA kunt u gemakkelijk aantonen dat de uitgangsspanning U_z gelijk is aan het product van de twee ingangsspanningen:

$U_z = \Delta U_{in} \bullet I_{abc} \bullet R3 \bullet 19{,}2$

Maar:

$\Delta U_{in} = U_x$

en:

$I_{abc} = [(-U_b) - U_y] / R2$

Er bestaat dus een recht evenredig verband tussen de stuurstroom en de U_y-spanning. Dit recht evenredige verband kunt u voorstellen door een constante factor φ, waarmee U_y vermenigvuldigd moet worden:

$I_{abc} = \varphi \bullet U_y$

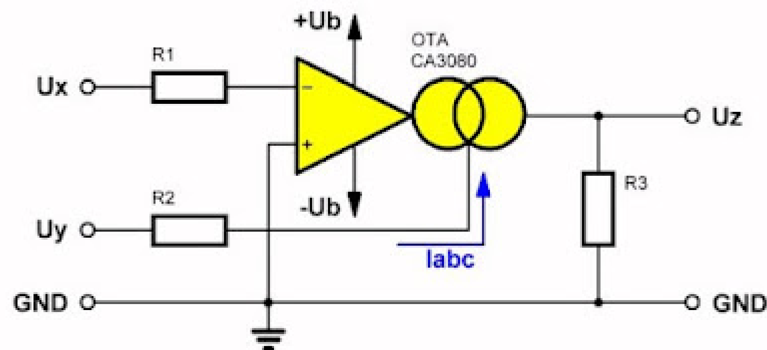
Als u alle formules combineert ontstaat:

$U_z = U_x \bullet U_y \bullet \varphi \bullet R3 \bullet 19{,}2$

Of:

$U_z = \varphi' \bullet U_x \bullet U_y$

De spanning die op de uitgang gemeten wordt is gelijk aan het product van de twee ingangsspanningen, vermenigvuldigd met een constante factor φ'.



Het principe van een analoge vermenigvuldiger. (© 2019 Jos Verstraten)

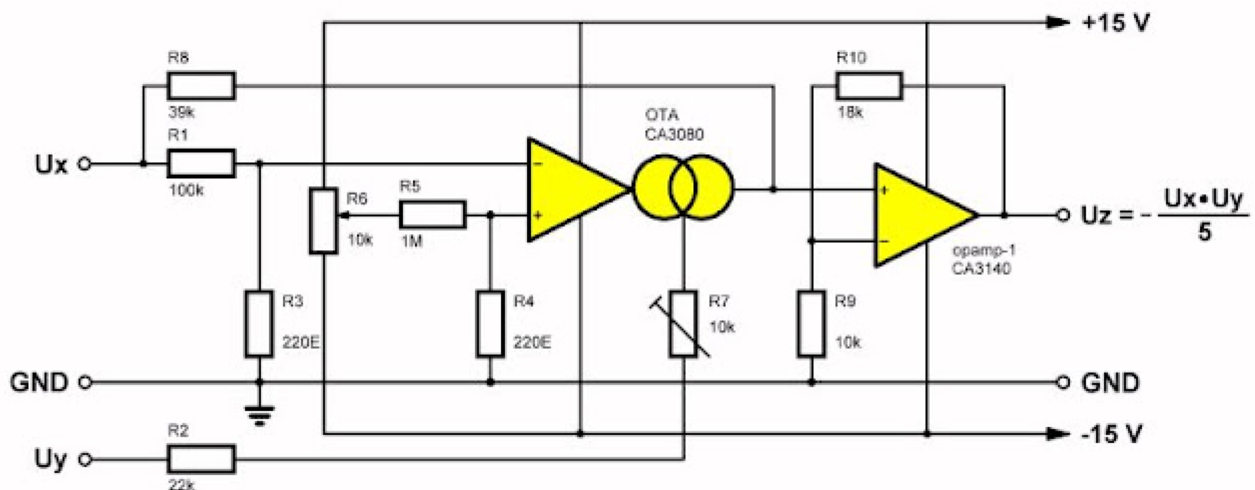
Praktisch schema van een analoge vermenigvuldiger

In de onderstaande figuur is de praktische uitwerking van een analoge vermenigvuldiger met een CA3080 getekend. De twee ingangsspanningen kunnen variëren tussen -5 V en +5 V. De uitgangsstroom van de OTA wordt weer op de bekende manier omgezet in een laagimpedante uitgangsspanning. Op de uitgang staat een spanning, die gelijk is aan 1/5 van het negatieve product van beide ingangsspanningen.

Het afregelen van de vermenigvuldiger gaat als volgt:

- Zet U_y op 0 V en U_x op +5 V en regel R6 af op minimale spanning op de uitgang.
- Zet U_x op 0 V en U_y op +5 V en regel R7 af op minimale spanning op de uitgang.
- Herhaal deze twee afregelingen totdat deze elkaar niet meer beïnvloeden.

Een belangrijke opmerking is dat beide ingangsspanningen uit zeer lage impedanties geleverd moeten worden. Is dat niet het geval, dan zullen de uitgangsimpedanties van de schakelingen die de ingangsspanningen leveren de werking van de schakeling verstoren. In de praktijk moet u dus steeds met twee als spanningsvolger geschakelde operationele versterkers werken!

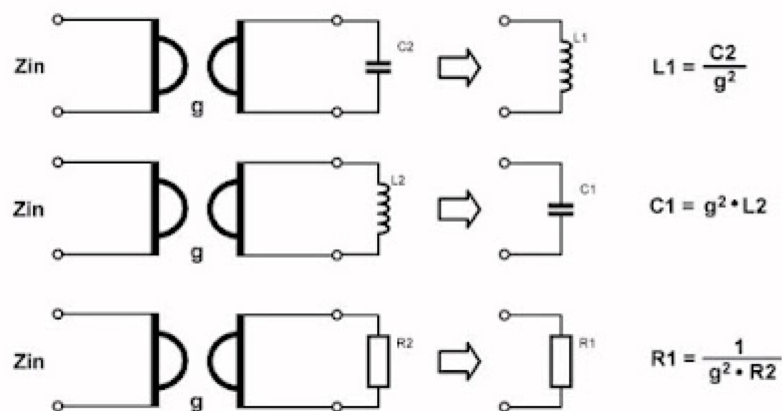


Een praktische analoge vermenigvuldiger met een OTA. (© 2019 Jos Verstraten)

De OTA als gyrator

Wat is een gyrator?
Een gyrator is een van de vreemdste 'onderdelen' die er in de elektronica te vinden zijn. Evenals een weerstand, een condensator en een spoel is een gyrator een passief element. Bovendien is het een zogenoemde *'twee-poort'*, hetgeen wil zeggen dat de schakeling twee kanten of poorten heeft en er energie van de ene naar de andere poort wordt overgedragen. Een typisch voorbeeld van een twee-poort is een gewone nettrafo. Het elektronische symbool van een gyrator is getekend in de onderstaande figuur.
De universele formules die de overdracht van de gyrator definiëren zijn te vergelijken met de formules van een transformator:
$i_2 = -g \bullet u_1$
en:
$i_1 = g \bullet u_2$
Uit deze vergelijkingen blijkt dat een gyrator een primaire stroom i_1 omzet in een secundaire spanning u_2 en een primaire spanning u_1 omzet in een secundaire stroom i_2. De constante g wordt de gyrator-constante genoemd en deze grootheid heeft de omgekeerde Ohm (Ω^{-1}) als eenheid.
Een van de voornaamste eigenschappen van een gyrator is dat als één poort belast wordt met een impedantie, deze impedantie zich ook op de andere poort zal uiten. Als u, zoals in de bovenste figuur is getekend, één poort van de gyrator belast met een condensator C2, dan zal deze capaciteit zich aan de andere poort uiten als een inductantie of spoel, waarvan de waarde gegeven wordt door de uitdrukking:
$L1 = C2 / g^2$
Op deze eenvoudige manier kunt u dus een condensator schijnbaar omzetten in een spoel! Het zal wel duidelijk zijn dat dit principe schitterende praktische perspectieven biedt. Spoelen zijn niet de meest handige onderdelen om in een schakeling toe te passen. Spoelen zijn groot, duur, zwaar en zeer gevoelig voor het oppikken van elektromagnetische strooivelden en storingen. Vandaar dat iedere ontwerper er naar streeft schakelingen zo te ontwerpen dat er geen behoefte bestaat aan spoelen. Toch zijn er bepaalde schakelingen waarbij u niet ontkomt aan het gebruik van spoelen. Te denken valt een zeer smalbandige afgestemde filters, waarbij de smalbandige karakteristieken ontstaan door een parallelschakeling van spoelen en condensatoren. Zolang de frequentie waarop de kringen afgestemd moeten worden in het MHz-bereik ligt, kunt u gebruik maken van kleine condensatoren en spoelen. Moet u echter een zeer laagfrequente smalbandige afgestemde versterker maken, dan moet u praktisch onrealistisch grote spoelen gebruiken. In dit soort gevallen kan een gyrator uitkomst bieden. Een spoel is immers te simuleren door een gyrator te ontwerpen en de secundaire poort zuiver capacitief te belasten. De combinatie van gyrator plus condensator wordt dan door de rest van de schakeling gezien als een gewone spoel, met de door de

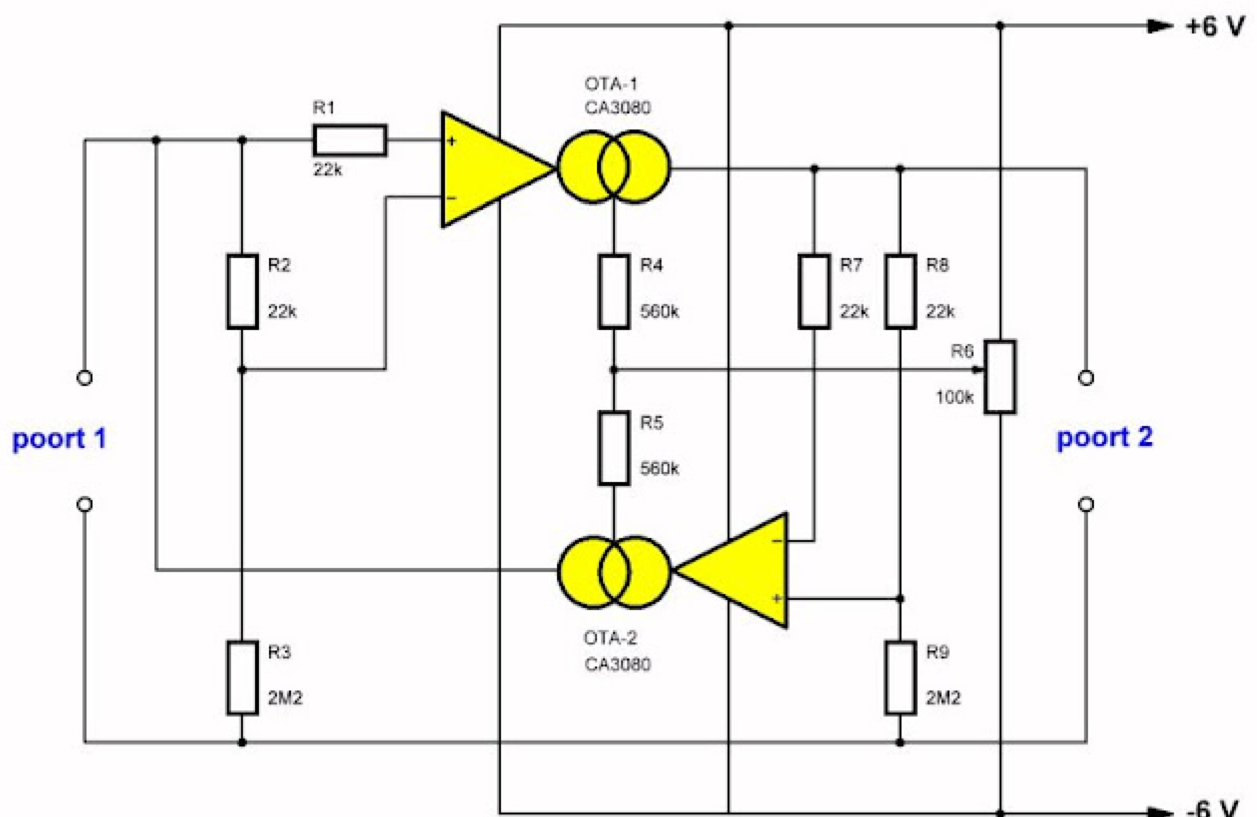
formule gegeven waarde.



De gyrator kan opgevat worden als een impedantie-omzetter. (© 2019 Jos Verstraten)

Gyrator met twee OTA's

Gyratoren kunnen op verschillende manieren opgebouwd worden. Een van de beste manieren is door gebruik te maken van twee OTA's. Uit de gyrator-vergelijkingen volgt immers dat er een bepaald lineair verband bestaat tussen de primaire spanning en de secundaire stroom. Dat is nu precies iets dat, zoals bekend, bij een OTA ook het geval is. In de onderstaande figuur is het praktische schema getekend van een gyrator-schakeling die opgebouwd is rond twee OTA's van het type CA3080.
Als u op de secundaire poort 2 een ongepoolde condensator van 3 µF aansluit, dan ontstaat er op poort 1 een zelfinductie van niet minder dan 10.000 H! De gyrator-constante van deze schakeling is gelijk aan 0,016. Het bruikbare frequentiebereik loopt tot 10 kHz. Vanwege de bijzondere eigenschappen van de schakeling kunt u de primaire poort belasten met wisselspanningen tot 25 $V_{effectief}$. De kwaliteitsfactor Q van de spoel ligt tussen de 10 en 15. Met behulp van de potentiometer R6 kunt u de I_{abc} van beide OTA's gezamenlijk regelen. Met deze regeling kunt u de gyrator-constante instellen.



Het praktische schema van een gyrator met twee OTA's. (© 2019 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling

Het zou in het kader van dit artikel over de CA3080 te ver voeren om de werking van deze schakeling tot in alle details te bespreken. Dat zou bovendien alleen maar kunnen met een behoorlijk grote dosis wiskunde. Maar wel is instinctief aan te voelen dat de schakeling voldoet aan de universele gyrator-uitdrukkingen. De uitgangsstroom van de bovenste OTA bepaalt immers de ingangsspanning van de onderste OTA. En de uitgangsstroom van deze schakeling beïnvloedt de ingangsspanning van de bovenste OTA. Hetgeen precies door de twee eerder gepubliceerde formules wordt aangegeven als een van de fundamentele eigenschappen van een gyrator.

Met behulp van dergelijke schakelingen kunt u dus grote spoelen simuleren door de secundaire poort van de gyrator te belasten met een vrij kleine condensator. Een tweede groot voordeel is dat de waarde van de spoel kan worden afgeregeld door het instellen van de I_{abc} van beide OTA's.